



**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING
AND INFORMATION SCIENCE**



**INFORMATION TECHNOLOGY AND
ELECTRICAL ENGINEERING -
DEVICES AND SYSTEMS,
MATERIALS AND TECHNOLOGIES
FOR THE FUTURE**

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12391>

Impressum

Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff

Redaktion: Referat Marketing und Studentische
Angelegenheiten
Andrea Schneider

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Susanne Jakob
Dipl.-Ing. Helge Drumm

Redaktionsschluss: 07. Juli 2006

Technische Realisierung (CD-Rom-Ausgabe):
Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau
Dipl.-Ing. Christian Weigel
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
Dipl.-Ing. Helge Drumm

Technische Realisierung (Online-Ausgabe):
Universitätsbibliothek Ilmenau
[ilmedia](#)
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau

Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.
Werner-von-Siemens-Str. 16
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2006

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Mit Ausnahme der gesetzlich zugelassenen Fälle ist eine Verwertung ohne Einwilligung der Redaktion strafbar.

ISBN (Druckausgabe): 3-938843-15-2
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-938843-16-0

Startseite / Index:
<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12391>

I. Konotop / A. Novitskiy / H. Schau / S. Westheuser

Analyse von Spannungseinbrüchen in Niederspannungsnetzen auf der Grundlage der mathematischen Modellierung elektromagnetischer Ausgleichsvorgänge

1. EINFÜHRUNG

Die Qualität der Versorgung mit elektrischer Energie wird im wesentlichen durch die Faktoren Versorgungszuverlässigkeit und Elektroenergiequalität (insbesondere Spannungsqualität) bestimmt. Spannungseinsenkungen (voltage dips) stellen dabei ein wichtiges Kriterium für die Elektroenergiequalität und die Versorgungssicherheit dar. Solche Spannungseinbrüche entstehen vorrangig aus extremen Laständerungen und insbesondere aus Kurzschlüssen. Die Spannungseinbrüche können zu Funktionsstörungen elektrischer Betriebsmittel und Komponenten (Schütze, Rechentechnik, Netzschutzeinrichtungen, Antriebe etc.) führen, die mit gravierenden Folgeschäden wie Datenverlust, Stillstand technologischer Prozesse nach Steuerungs- oder Antriebsausfall oder Fehlproduktion verbunden sein können. In Anbetracht der in den letzten Jahren stetig gestiegenen Zahl von sensiblen Verbrauchern gewinnt die Problematik der Spannungseinbrüche immer mehr an Bedeutung.

Ein Spannungseinbruch (voltage dip) ist eine zeitlich begrenzte Einsenkung des Effektivwertes der Versorgungsspannung auf unter 90% der vereinbarten Spannung. Der Spannungseinbruch ist durch die Tiefe (ΔU) und die Dauer (Δt) charakterisiert. Vereinfachte Betrachtungen auf der Grundlage einer Berechnung der stationären Kurzschlussströme [1] liefern generell nur eine Aussage zur Tiefe des Spannungseinbruchs. Der zeitliche Verlauf und die Dauer lassen sich auf diese Weise nicht bestimmen. Der Verlauf ergibt sich als Folge der elektromagnetischen Ausgleichsvorgänge und Wechselwirkungen im Netz.

Für die Modellierung der Voltage Dips bei Kurzschlüssen ist eine Simulation der Kurzschluss-Vorgänge mit Hilfe geeigneter Softwaremittel erforderlich, die das transiente Verhalten der Netzelemente berücksichtigt und auch eine Variation der Kurzschlussstellen, -arten und –dauer ermöglicht.

Es ist anzumerken, dass die Spannungseffektivwerte, die für den stationären Kurzschluss-Zustand im Netz berechnet werden, auch nicht immer den minimalen Spannungseffektivwerten entsprechen, die im Kurzschluss-Ausgleichsvorgang tatsächlich auftreten können. Das illustriert Bild 1. Im stationären Verfahren wird ein

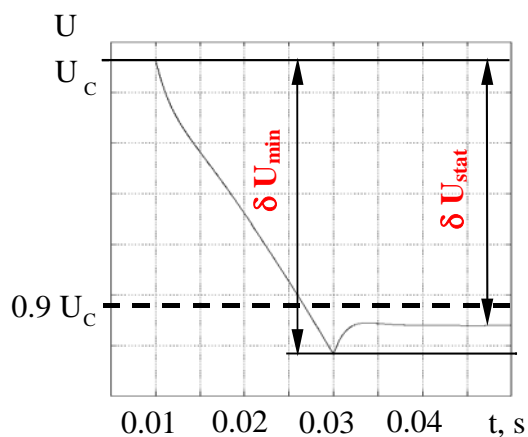


Bild 1: Spannungseffektivwert im Kurzschlussfall

Spannungseffektivwert δU_{stat} für die Tiefe des Einbruchs ermittelt, der kleiner als der tatsächlich im Ausgleichsvorgang auftretende Effektivwert δU_{min} ist. Es können falsche Aussagen bezüglich der zu erwartenden Tiefe der Spannungseinbrüche getroffen werden, wenn die Untersuchungen ausschließlich auf den Berechnungen der stationären Kurzschluss-Zustände beruhen bzw. die Berechnung mit Hilfe stationärer

Berechnungsmethoden vorgenommen werden. Aus diesem Grund ist die Verwendung von Simulationsprogrammen zur Berechnung von transienten Kurzschlussvorgängen, die auf der Lösung der entsprechenden Differentialgleichungssysteme basieren (EMTP, MATLAB etc.), für die Modellierung der Voltage Dips erforderlich.

2. EINFLUSS VON SYNCHRONGENERATOREN

Viele Einflussfaktoren wie z.B. Motoren, Generatoren mit ihren Regelungssystemen und Schutzsysteme [2] sind im Rahmen einer stationären Betrachtungsweise nur eingeschränkt oder überhaupt nicht berücksichtigbar. Um der Einfluss von Synchrongeneratoren auf den zeitlichen Verlauf von Spannungseinbrüchen zu betrachten, wurden umfangreiche Computersimulationen mit Hilfe von MATLAB und DigSILENT durchgeführt. Es wurde ein Generator-MATLAB-Modell (Zustandsgleichungen der 6. Ordnung in d,q- Koordinaten) benutzt. Es wurden

Windkraftanlagen (WKA), Dieselgeneratoranlagen (DA) und andere Generatoren für Inselnetze (z.B. in Schiffsnetzen, Notstromversorgungen oder autonomen Netzen) untersucht, die für den Niederspannungsbereich typisch sind (siehe Bild 2 a)). Besonders kritisch hinsichtlich der Spannungseinbrüche sind die Verhältnisse, die sich in autonomen Netzen mit isoliertem Generatorbetrieb ohne parallele Versorgung durch andere Netzeinspeisungen ergeben.

Die Struktur des verwendeten Generatormodells mit Drehzahlregelung (Primärregelung), Spannungsregelung und Erregersystem zeigt Bild 2 b). Als Spannungsregler wurde der Typ 1 (IEEE) in MATLAB, Simulink eingesetzt, wobei zwei Fälle mit verschiedenen Einstellungen betrachtet wurden (Bild 3 und Tabelle 1).

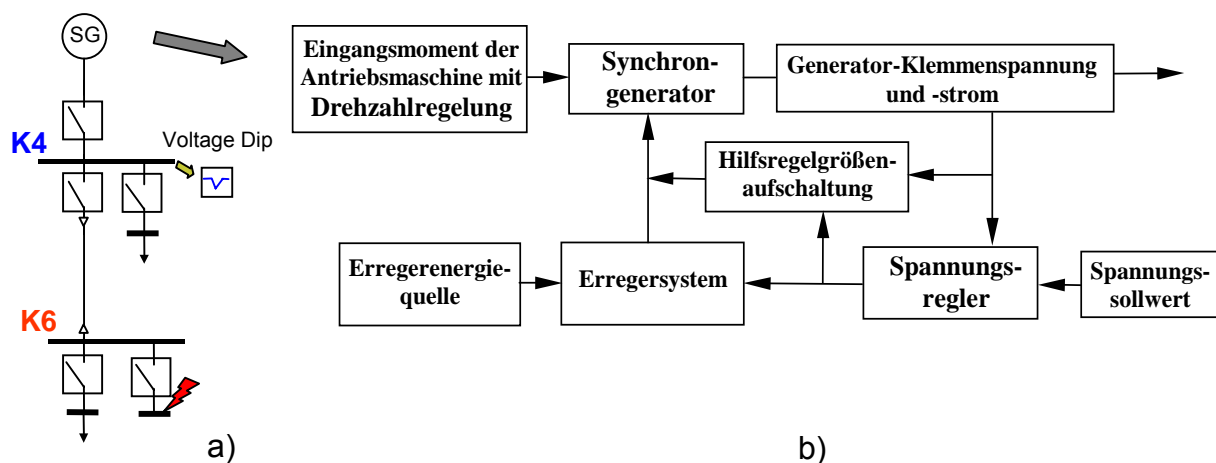


Bild 2: Schema des Inselnetzes (a) und der Regel- und Erregereinrichtungen des Generators (b)

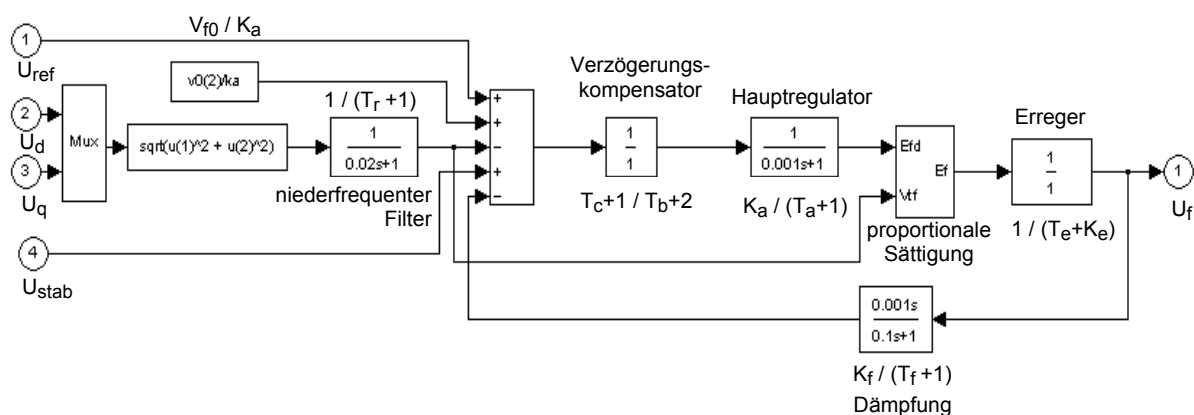


Bild 3: Spannungsregler für den Synchrongenerator Type 1 (IEEE) (MATLAB Simulink)

Tabelle 1. Einstellwerte des Spannungsreglers Typ 1 (IEEE)

Parameter	Fall (a)	Fall (b)
Zeitkonstante für niederfrequenten Filter, T_r , s	0,002	0,02
Zeitkonstante für Hauptregulator, T_a , s	0,001	0,02
Verstärkungskonstante für Hauptregulator, K_a	1	200
Erreger - Zeitkonstante, T_e , s	0	-
Verstärkungskonstante für Erreger, K_e	1	-
Zeitkonstante für die Dämpfung, T_f , s	0,1	0,1
Verstärkungskonstante für die Dämpfung, K_f	0,001	0,001

Es wurde festgestellt, dass sich in Abhängigkeit von den Einstellungen des Spannungsreglers unterschiedliche zeitliche Verläufe der Spannung ergeben. Das zeigt Bild 4, in dem die Ergebnisse für ein Berechnungsbeispiel mit unterschiedlichen Primärregelungen (WKA mit $P_m = f(n)$, DA mit $P_m = f(n)$ und unregelter Generator mit $P_m = \text{const}$) für die beiden Fälle der Einstellwerte des Spannungsreglers (Bild 4 a), b)) dargestellt sind.

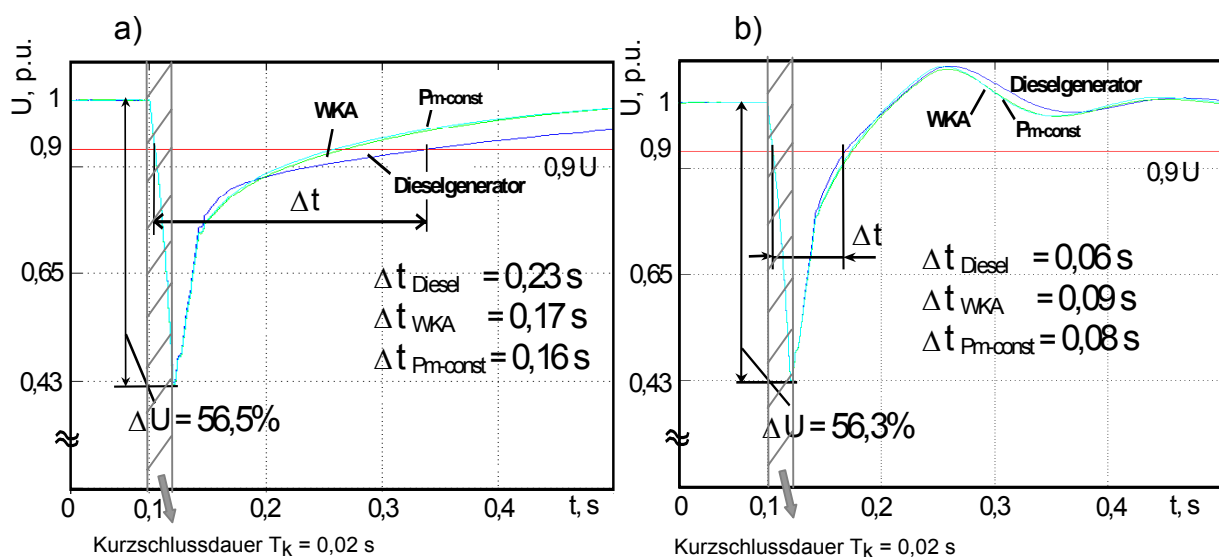


Bild 4: Zeitlicher Verlauf des Spannungseinbruchs für Generatoren mit unterschiedlichen Primärregelungen und Einstellwerten der Spannungsregelung (Fälle a und b)

Es wurden geregelte Generatoren für Windkraftanlagen (WKA) und Dieselgeneratoranlagen (DA) mit jeweils typischer drehzahlabhängiger mechanischer Leistungscharakteristik $P_m = f(n)$ betrachtet. Im Falle des unregelmäßigten Generators ist eine konstante mechanische Leistung $P_m = \text{const}$ angenommen worden.

Für den betrachteten Dieselgenerator beträgt die Dauer des Spannungseinbruchs beim 3-poligen metallischen Kurzschluss (Kurzschlussdauer $T_k=0,02\text{s}$) $0,23\text{ s}$ (siehe Bild 4 a, Δt_{Diesel}). Bei Änderung der Einstellwerte der Spannungsregelung verringert sich die Einbruchsdauer um ca. 70% (Bild 4 b, Δt_{Diesel}). Für die korrekte Ermittlung der Dauer des Spannungseinbruchs ist die Berücksichtigung der Spannungsregler und seiner Einstellwerte erforderlich.

Das Beispiel zeigt, dass Primär- und Spannungsregelung nur geringe Unterschiede im Hinblick auf die berechnete Tiefe des Spannungseinbruchs bewirken, dagegen jedoch deutlichen Einfluss auf die Einbruchsdauer besitzen. Die Einstellung des Spannungsreglers hat darüber hinaus erwartungsgemäß einen starken Einfluss auf den zeitlichen Verlauf. Zur Ermittlung der Tiefe des Spannungseinbruchs braucht keine spezielle Antriebsmaschine betrachtet zu werden; es ist ausreichend, mit $P_m = \text{const}$ zu rechnen.

3. GRENZEN STATIONÄRER BETRACHTUNGEN

Im Abschnitt 2 wurden die Ergebnisse der Berechnung von Spannungseinbrüchen auf der Grundlage der mathematischen Modellierung der elektromagnetischen Ausgleichsvorgänge (im folgenden als transiente Berechnungsverfahren gezeichnet) dargestellt. Sie erlauben eine vollständige Information über den zeitlichen Verlauf der Spannungseinbrüche. Um solche Berechnungen durchzuführen, benötigt man die geeigneten Softwaremittel. Um eine Aussage zu treffen, wann transiente Berechnungen erforderlich sind und wann stationäre Berechnungen angewendet werden können, wurden entsprechende Untersuchungen durchgeführt. Dazu wurde das Inselnetz (Bild 2a), das im vorherigen Abschnitt betrachtet wurde, mit variablen Parametern für das R/X-Verhältnis für Kurzschlussstrombahn und die Dauer des Kurzschlusses t_k untersucht. Da stationäre Betrachtungen generell keine Aussage zur der Dauer des Spannungseinbruchs liefern, wird der Vergleich bei der Verfahren im Hinblick auf die Genauigkeit der Ermittlung der Tiefe der Einbruchs vorgenommen. Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt wurden, bewirken die Primär-

und Spannungsregelung der Generatoren nur geringe Unterschiede hinsichtlich der Tiefe des Einbruchs. Deshalb wurde ein Synchrongenerator mit $P_m = \text{const}$ benutzt. Für die Spannungsregelung wurde ein Spannungsregler IEEE Typ 1 mit den Einstellungen gemäß Fall a) verwendet. Die Nennleistung des Generators beträgt $S_G = 630 \text{ kVA}$. Der Generator besitzt eine Resistanz von $R_G = 0,0042 \text{ Ohm}$ und eine subtransiente Synchronreaktanz von $X''_d = 0,036 \text{ Ohm}$.

Das R/X-Verhältnis ist ein charakteristischer Parameter für den Kurzschlussstromkreis, der sich im Fehlerfall ergibt. Er schließt den Einfluss des Generators (Generatorimpedanz) und der Leitungen bis zur Fehlerstelle ein. Im Netz besteht eine umgekehrte Proportionalität zwischen der Größe des Anfangskurzschlussstromes I''_k und der Höhe des R/X-Verhältnisses. Bei Kurzschlüssen am Generator oder in der Nähe des Generators (generatornahe Fehler) liegen die größten Kurzschlussströme vor; das R/X-Verhältnis ist klein und wird hauptsächlich durch die Generatorimpedanz (R_G, X''_d) bestimmt. Mit wachsender Entfernung des Kurzschlussortes vom Generator wird das R/X-Verhältnis zunehmend mehr durch die Kabelimpedanzen (R_K, X_K) bestimmt: $R/X = (R_G + R_K) / (X''_d + X_K)$; es wird deshalb größer. Die Kurzschlussströme I''_k nehmen dagegen auf Grund der sich vergrößernden Impedanz ab. Da der Kurzschlussstrom I''_k die Tiefe des Spannungseinbruchs bestimmt, wird das R/X-Verhältnis als Einflussgröße behandelt und als Parameter bzw. Kriterium für den Vergleich zwischen stationärem und transientem Berechnungsverfahren gewählt.

Die Ergebnisse vergleichender Berechnungen sind im Bild 4 ausgewertet. Es wurden dreiphasige Kurzschlüsse betrachtet. Die Kurve 1 in Bild 4 zeigt die Grenze für das Auftreten von Voltage Dips ($U < 0,9 U_e$), die sich hinsichtlich der Tiefe des Spannungseinbruchs aus stationären Berechnungen ergibt. Bei Durchführung transienter Berechnungen ergibt sich eine Verschiebung dieser Grenze zu höheren Werten des R/X-Verhältnisses (Kurve 2, Bild 4). Die Fläche zwischen den Kurven 1 und 2 kennzeichnet eine Zone, in der stationäre Berechnungen grundsätzlich keine korrekten Ergebnisse liefern. Unterhalb von Kurve 1 besteht der Bereich, in dem nach beiden Berechnungsverfahren grundsätzlich Voltage Dips ermittelt werden. Für die Tiefe des Einbruchs kann sich nach beiden Berechnungen allerdings generell ein großer Unterschied ergeben. Die Kurven 3,4,5 in Bild 5 zeigen Grenzen für einen definierten prozentualen Unterschied zwischen der Tiefe der Spannungseinbrüche, die sich aus transienten und stationären Berechnungen ergeben.

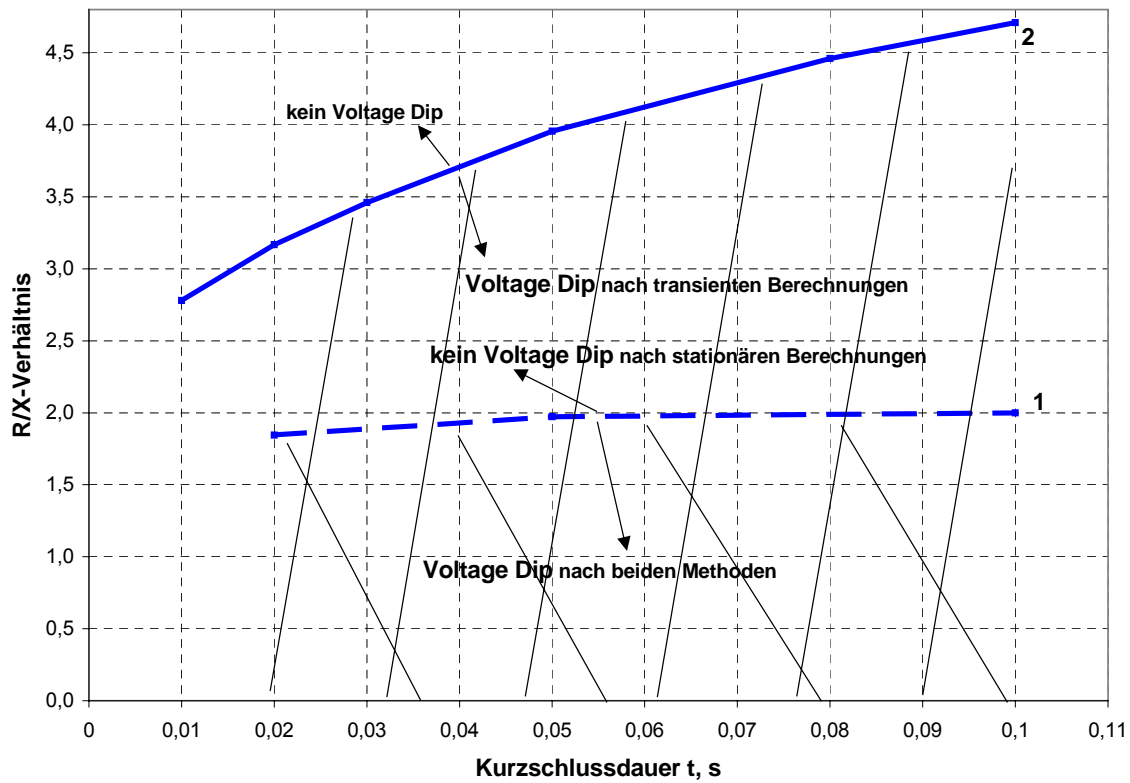


Bild 4. Grenzen der Netzparameter für das Auftreten von Spannungseinbrüchen bei stationärer (1) und transienter (2) Berechnung.

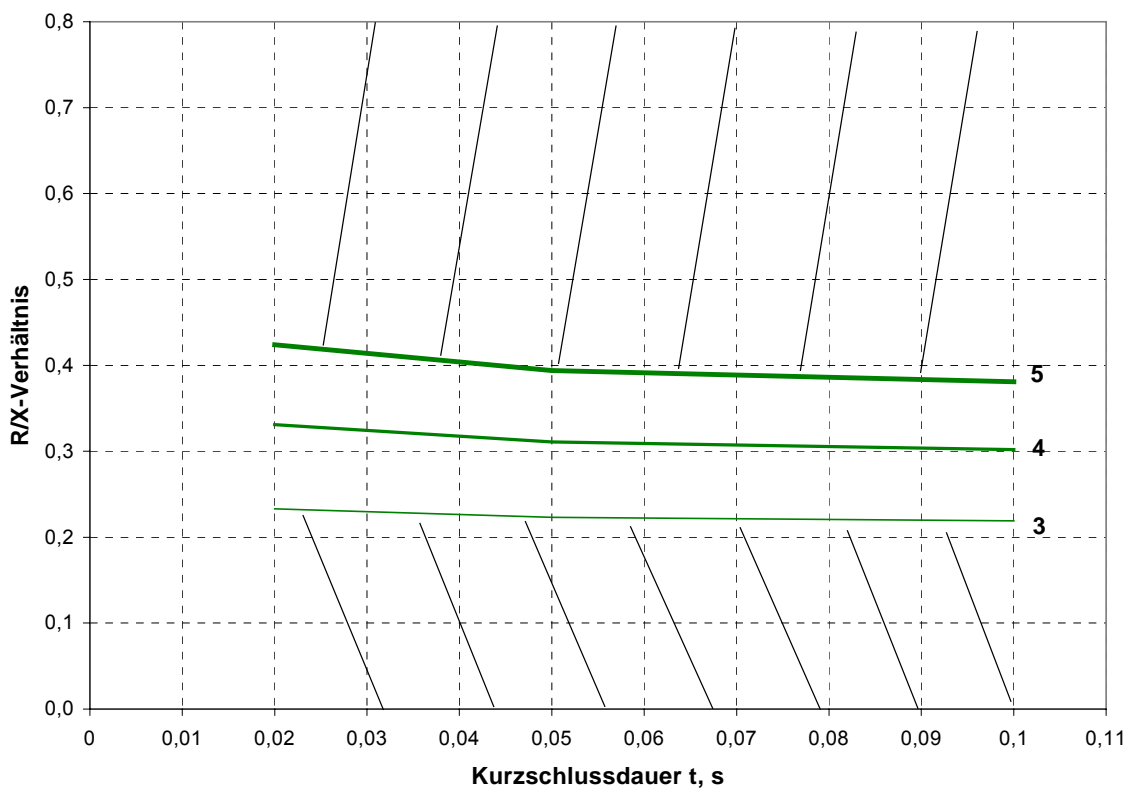


Bild 5. Grenzen der Anwendbarkeit von stationären Berechnungsverfahren für unterschiedliche prozentuale Abweichungen der Tiefe der berechneten Einbrüche:

- Kurve 3 - 5%
- Kurve 4 - 10%
- Kurve 5 - 15%

Diese Grenzen charakterisieren damit den Fehler, der bei Ausführung stationärer Berechnungen hinsichtlich der Tiefe der Spannungseinbrüche entsteht. Wenn die zulässige Abweichung der berechneten Einbruchtiefe mit 5 % angenommen wird, dann wird der Bereich für die Anwendbarkeit der stationären Berechnungen gemäß Kurve 3 eingeschränkt (R/X -Verhältnisse $R/X \leq 0,4$). Aus der Grafik ist auch zu sehen, dass umso größere Abweichungen zwischen den Berechnungsergebnissen können auftreten, je größer die Zahlenwerte des R/X -Verhältnisses sind.

Die vereinfachte Berechnungen der Spannungseinbrüche wurde auf der Grundlage der Bestimmung der stationären Kurzschlussströme nach VDE [1] vorgenommen. In [1] wird in generatornahe und generatorferne Kurzschlüsse unterschieden. Ein generatornaher Kurzschluss ist dadurch charakterisiert, dass nicht nur der aperiodische Gleichstromanteil sondern auch ein Wechselstromanteil mit abklingender Amplitude berücksichtigt wird und dadurch sich kompliziertere Bedingungen für die Berechnung ergeben. Im untersuchten Fall müssten dadurch auch genauere Ergebnisse hinsichtlich der daraus berechneten Spannungseinbrüche resultieren.

Im Bild 6 ist mit Kurve 6 die Grenze eingezeichnet, die sich hinsichtlich des R/X -Verhältnisses ergibt, wenn zum einen von generatornahe und zum anderen von

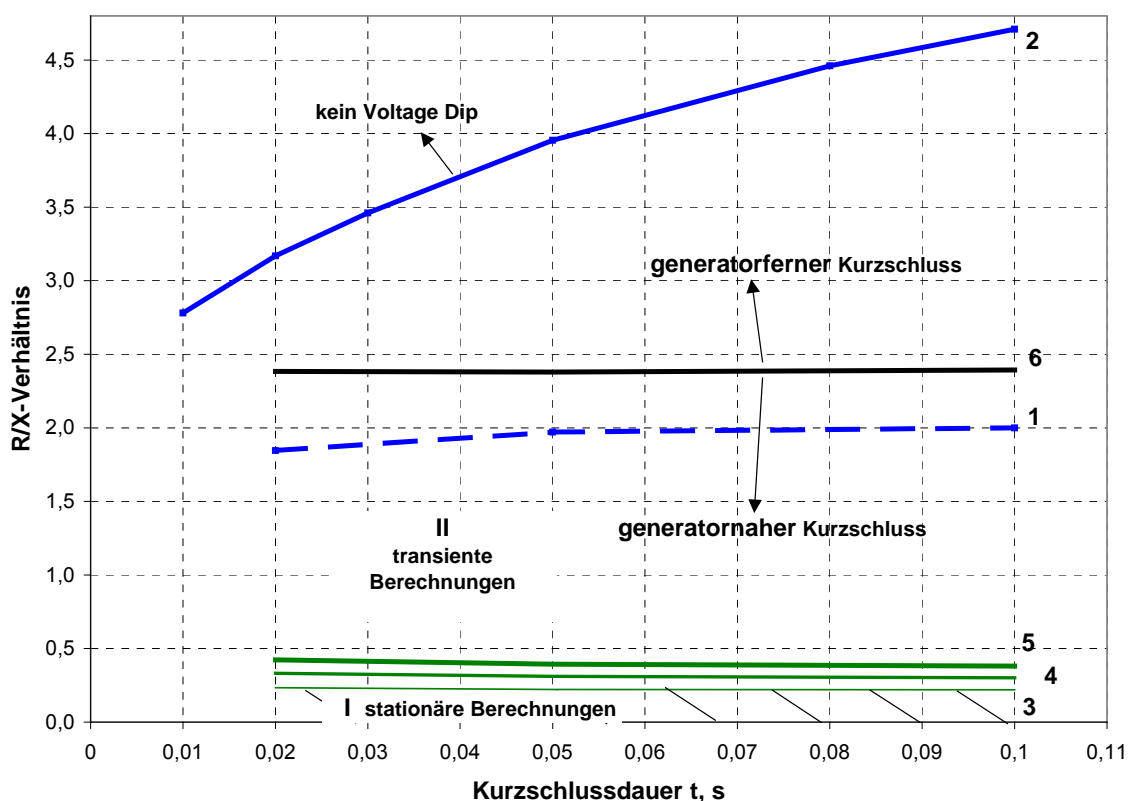


Bild 6. Grenzlinie (6) für generatornahe und generatorferne Kurzschlüsse nach stationärer Kurzschlussstromberechnung (VDE-Verfahren)

generatorfernem Kurzschluss ausgegangen wird. Da diese Grenze in dem Bereich liegt, in dem ohnehin transiente Berechnungen durchgeführt werden müssen, erübrigt sich die Fragestellung, ob bzw. wann für eine stationäre Berechnung vom generatornahen oder vom generatorfernen Kurzschlussfall ausgegangen werden muß.

Zusammenfassend kann für das betrachteten Beispielnetz damit die Schlussfolgerungen gezogen werden, dass anhand der Grenzen in Bild 5 im Zusammenhang mit der gewünschten Genauigkeit beurteilt werden kann, wann eine stationäre Berechnung ausreichend ist und ab wann transiente Berechnungen erforderlich sind.

Um zu prüfen, ob die Ergebnisauswertung in Bild 5 ein Sonderfall ist oder eine allgemeine Tendenz zeigt, wurde eine zusätzliche Untersuchung mit verschiedenen Querschnitten der Kabel im Netz durchgeführt. In diesen Berechnungen wurde als variabler Parameter der Leiterquerschnitt S im Bereich $35 \dots 150 \text{ mm}^2$ variiert. Es wurden Aluminiumkabel NAYY betrachtet. Die Ergebnisse zeigen eine Änderung der Grenzen für das Auftreten von Einbrüchen in Abhängigkeit von den Standardquerschnitten im obengenannten Bereich sowohl für die transienten als auch die stationären Berechnungen (siehe Bild 7). Die Kurven 1 und 2 des Bildes 7 zeigen ebenso wie im Bild 5 die Grenzen für das Auftreten von Voltage Dips nach stationärer und transienter Berechnung.

Die Ergebnissen zeigen, dass sich bei Erhöhung des Querschnittes (d. h. Verringerung der Kabelimpedanz) der Unterschied zwischen den Berechnungsergebnissen, die sich aus stationären und transienten Berechnungen ergeben, reduziert. Zugleich besteht jedoch die gleiche allgemeine Tendenz, die auch in Bild 5 enthalten ist. Es zeigt sich, dass der Querschnitt der Kabel nur einen geringen Einfluss auf die untere Grenze für die Anwendbarkeit stationärer Berechnungen besitzt (siehe Bild 8).

Trotz des Unterschiedes, der sich querschnittsbedingt und querschnittsabhängig hinsichtlich der oberen Grenzen des Auftreten von Spannungseinbrüchen ergibt, können diese Ergebnisse als weitgehend allgemeingültig angesehen werden.

Bild. 8.
Prozentualer
Unterschied von
5%, 10% und 15%
für die Tiefe der
Spannungs-
einbrüche, die sich
aus transienten
und stationären
Berechnungen für
Kabel NAYY mit
Querschnitten von
35...150 mm²
ergeben

4. ZUSAMMENFASSUNG

Die betrachteten Beispiele zeigen, dass Primär- und Spannungsregelung von Synchrongeneratoren einen deutlichen Einfluss auf die Dauer des Spannungseinbruchs besitzen. Aus diesem Grund kann geschlussfolgert werden, dass transiente Berechnungen erforderlich sind.

Andererseits kann die Bestimmung der Tiefe des Einbruchs unter Umständen auch für generatornahe Kurzschlüsse bei Vorgabe der Kurzschlussdauer durch stationäre Berechnung mit ausreichender Genauigkeit ermittelt werden.

Die Grenzen der Anwendung von stationären Berechnungsverfahren werden an einem Beispiel im Zusammenhang mit der gewünschten Berechnungsgenauigkeit gezeigt. An diesem Beispiel werden auch die praktischen Grenzen für die Netzparameter dargestellt, bei denen im Inselnetz überhaupt Spannungseinbrüche auftreten und unter welchen Bedingungen eine stationäre Berechnung diesbezüglich korrekte Ergebnisse erbringt.

Die für verschiedene Querschnitte von Kabeln durchgeführten Untersuchungen ermöglichen es die festgestellten Tendenzen zu verallgemeinern.

Literatur:

- [1] DIN EN 60909-0: Kurzschlussströme in Drehstromnetzen, Teil 0: Berechnung der Ströme, 2001
- [2] H. Schau, A. Novitskiy, I. Konotop: Mathematical Modelling of Voltage Dip Transients in LV Networks. 11. Internationale Konferenz ICHQP, 12-15.09.2004, Lake Placid/USA, Tagungsband Beitragsnummer hqp 143 (auf CD-ROM).

Autoren:

DI Irina Konotop, PD Dr.-Ing. habil. Holger Schau, Dr.-Ing. Alexander Novitskiy, DI Sven Westheuser
Technische Universität Ilmenau, FG Elektrische Energieversorgung, PF 10 05 65, D-98684 Ilmenau,
Deutschland
Tel.: +49 (3677) 692838, Fax.: +49 (3677) 691496
E-Mail: irina.konotop@tu-ilmenau.de, holger.schau@tu-ilmenau.de, nov@e-technik.tu-ilmenau.de,
s.westheuser@gmx.de